



Zout

ZOUT

Onverstoord zout is ondoordringbaar.

Zout heeft een hoge thermische geleidbaarheid, waardoor een relatief compact eindberging mogelijk is.

Zout is droog.

Zout stroomt (kruipt) en kapselt materiaal in.

Er is meer dan duizend jaar ervaring met zoutwinning en er bestaat al een eindberging in zout.

Landen die zout overwegen: Nederland, VS, Duitsland, Australië.

Kegelvormige hoed van een jong (11-13 jaar) kind uit de bronstijd:
Uit Reschreiter en Kowarik, 2019



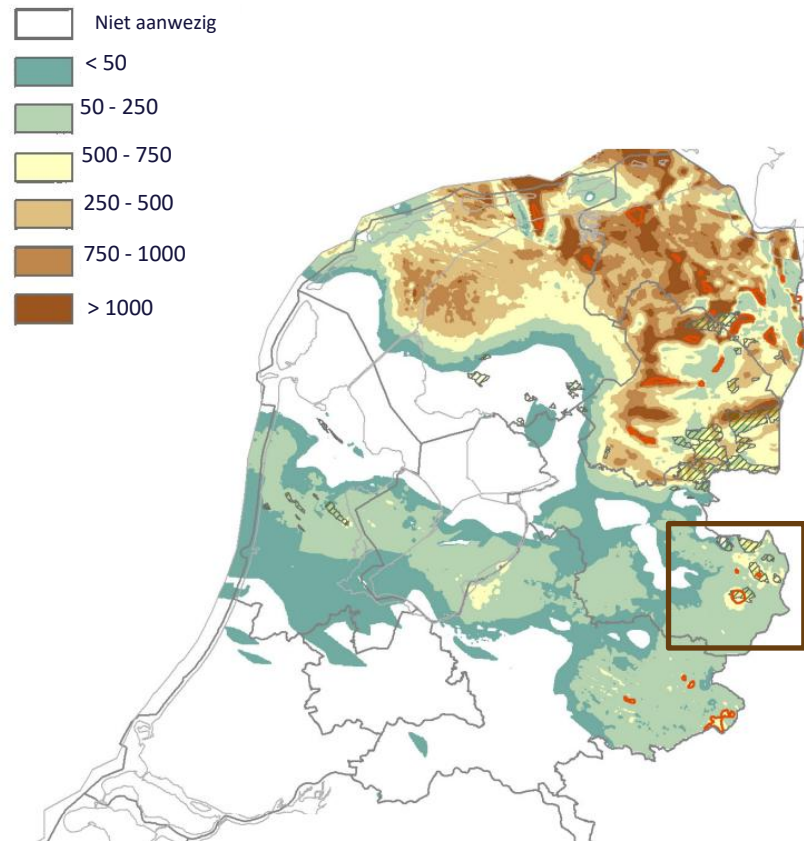
WIPP FACILITY, USA



De WIPP bevindt zich op 660 meter diepte in een gelaagde zoutformatie (Salado-formatie).

ZOUT

Twee zoutafzettingen in Nederland zijn mogelijk geschikt voor berging: de Permische (298,9 tot 252,2 miljoen jaar geleden) Zechstein- en Trias-Röt zout (251,9 tot 201,3 miljoen jaar geleden). Beide liggen in het noorden en oosten, met diktes variërend van meters tot kilometers. Hoewel ze over het algemeen zuiver zijn, varieert hun samenstelling. De afbeelding rechts toont de dikte van het Zechstein zout.

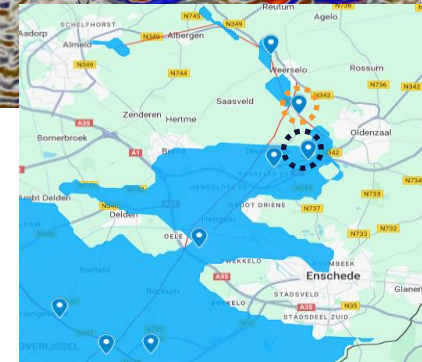


Ook op geringere diepte (DEW-03) komt enkele honderden meters Zechsteinzout voor, maar de laterale samenhang is onzeker. De boringen dateren uit 1943. Het gebied valt binnen de concessie van Nouryon.

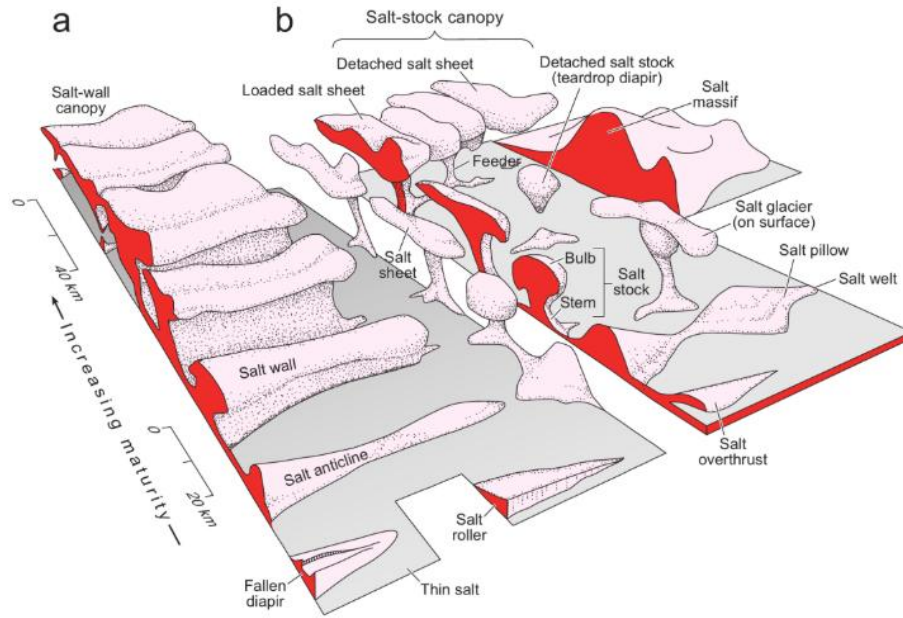
Ook op geringere diepte (DEW-03) komt enkele honderden meters Zechsteinzout voor, maar de laterale samenhang is onzeker. De boringen dateren uit 1943. Het gebied valt binnen de concessie van Nouryon.



Auzemery et al., in progress

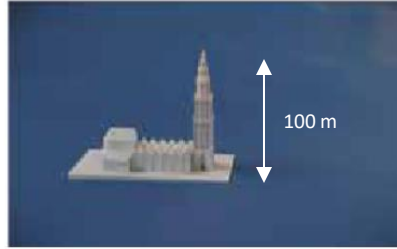


ZOUT



Zoutlagen blijven niet altijd (relatief) horizontaal; in de loop van de geologische tijd kan het vervormen door (o.a.) verschil in dichtheid, waardoor een grote verscheidenheid aan grote ondergrondse zoutstructuren ontstaat.

ZOUT



Deze zoutstructuren vormen een bergachtig landschap onder de Nederlandse oppervlakte. Deze zoutbergen kunnen kilometers hoog en kilometers breed zijn. De kerk rechts is de Martinitoren in Groningen, die ongeveer 100 meter hoog is.

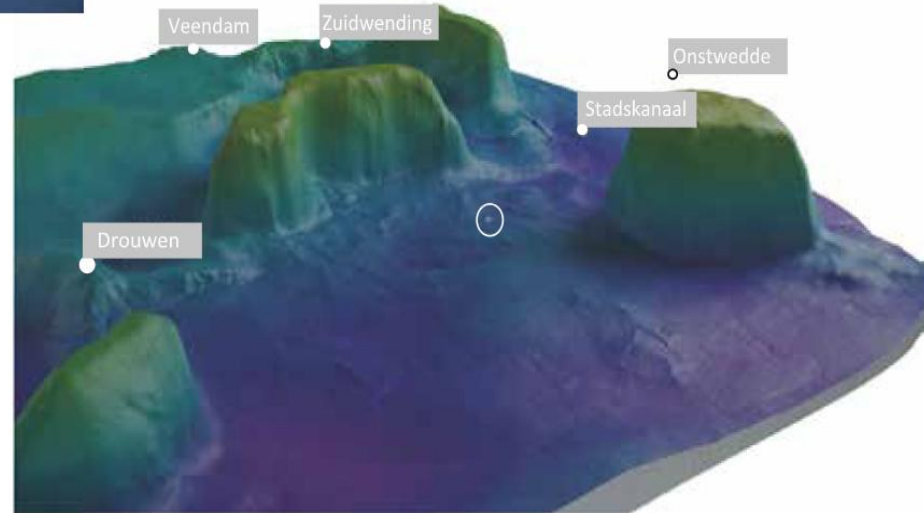
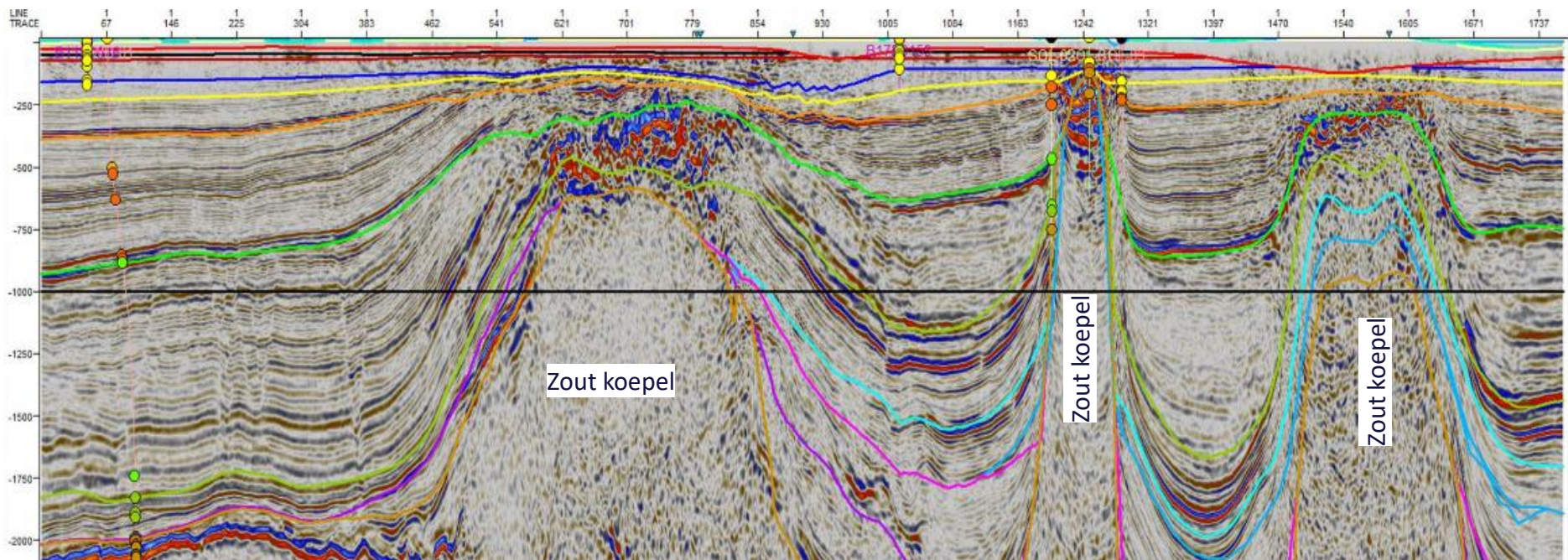


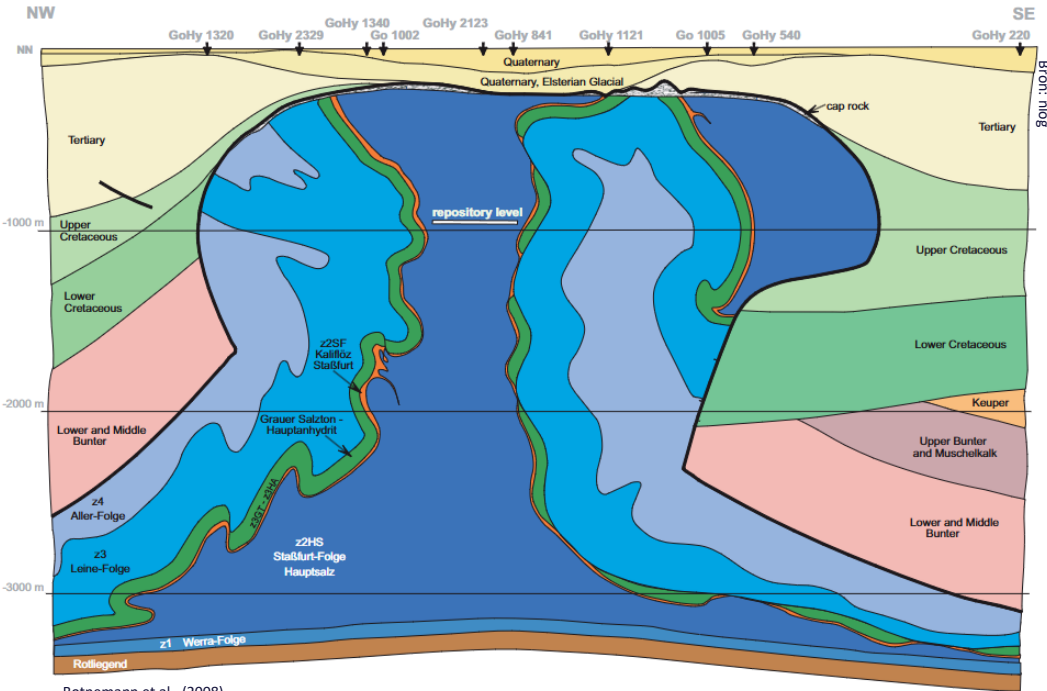
Image is from Andreas Kruisselbrink | TNO – Geologische Dienst Nederland.

ZOUT

Net als bij het gelaagde zout is het niet altijd duidelijk waar de bovenkant of de zijanten van de zoutkoepels zich bevinden, wat er zich bovenin de zoutkoepel bevindt en wat zich binnenin de zoutkoepel bevindt.



ZOUT



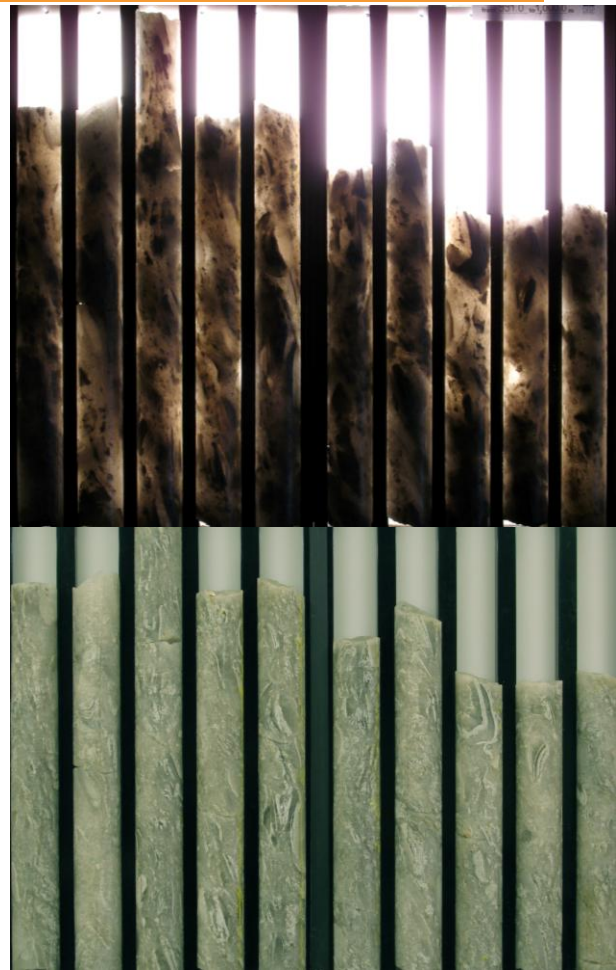
Botnemann et al., (2008)

De binnenkant van een zoutkoepel kan, maar hoeft niet per se, complex op macro schaal te zijn, met verschillende soorten zout en lagen Anhydriet ertussen. Het voorbeeld links is de zoutkoepel van Gorleben, die uitgebreid is onderzocht. Bij dit onderzoek zijn o.a. 4 diepe boorkernen geboord (2000 m), 44 ondiepe boorkernen (enkele meters in het zout) en 96 seismisch profielen (+ 400 km).

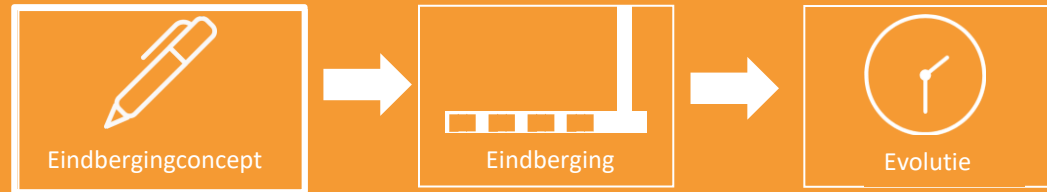
ZOUT

Foto's van boorkernen van de zoutkoepel Zoutwending. Die inhomogeniteit zien we ook op kleine schaal terug in de kernen die zijn genomen uit de zoutkoepel in Zuidwending. Deze inhomogeniteit betekent overigens niet dat een zoutkoepel ongeschikt is: vaak zijn deze inhomogeniteiten het resultaat van kleine verschillen (bv. iets meer/minder klei) in samenstelling en hebben ze verder geen effect op de veiligheid van de eindberging.

Bron: nlog

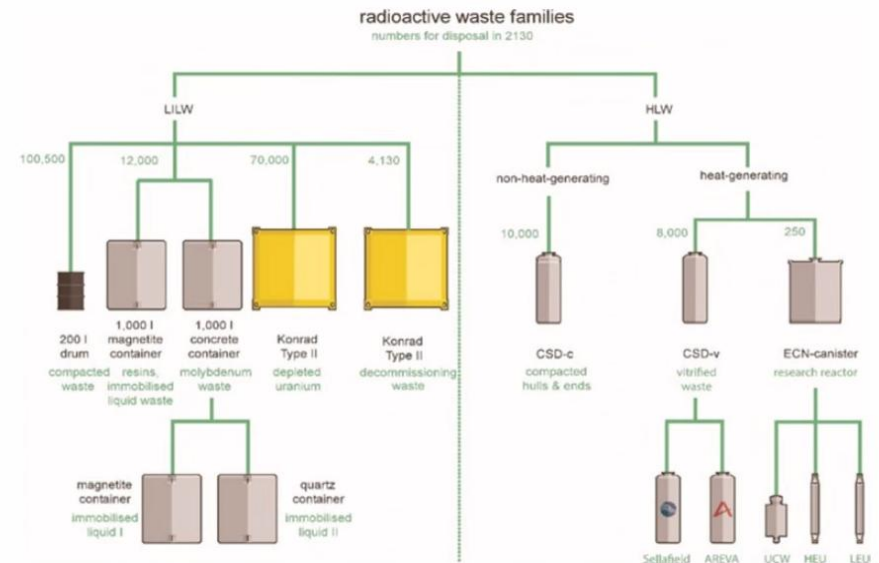
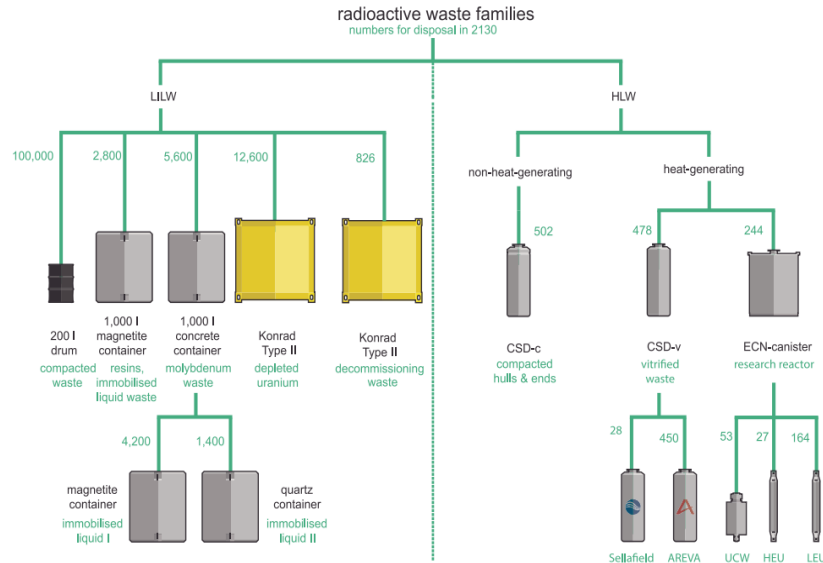


EINDBERGING



EINDBERGING

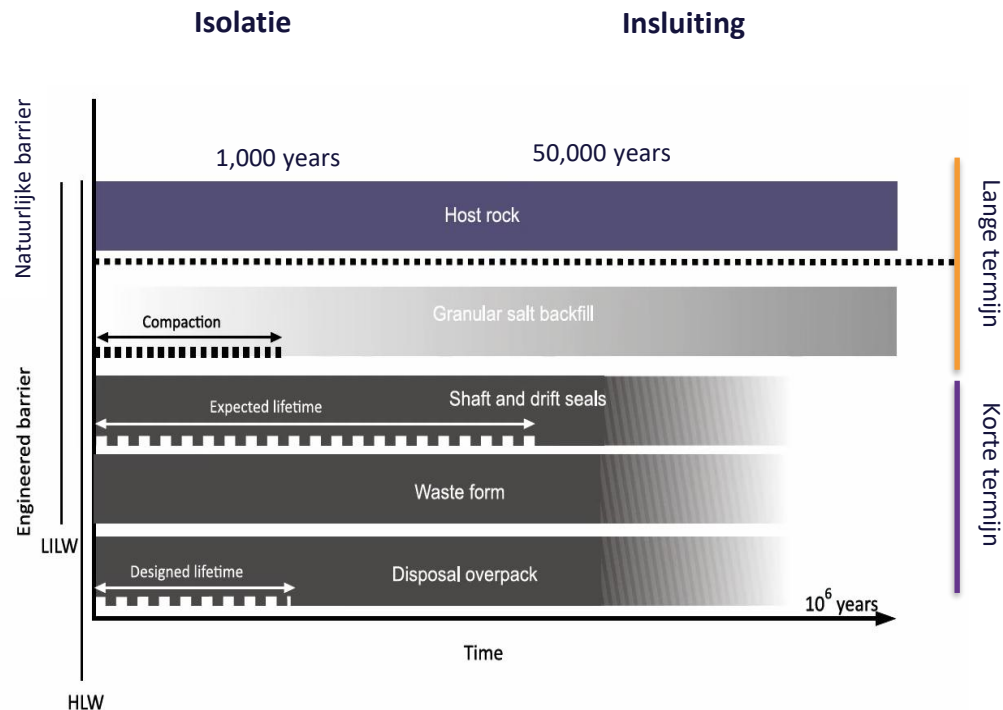
De verwachte hoeveelheid afval die in Nederland geborgen moet worden. De schatting links gaat uit van een 'business as usual'-scenario. De overheid overweegt echter momenteel de bouw van vier nieuwe reactoren, waardoor de verwachte hoeveelheid te borgen afval zou toenemen (rechts).



EINDBERGING

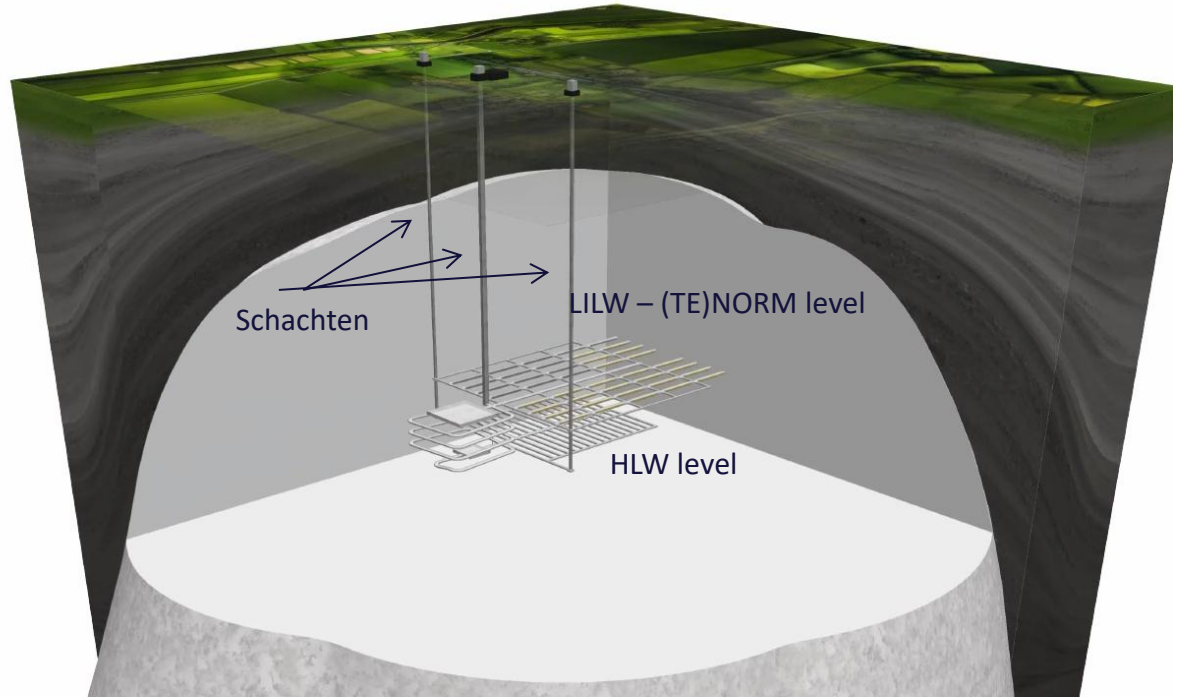
Voor een opslagplaats in steenzout is de enige routes voor radionucliden om de bovenlaag en de biosfeer te bereiken, zijn via de tunnels en schachten van de opslagplaats.

Hier worden meerdere gemaakte barrières gebruikt. Op de korte termijn zijn dit onder andere de verpakking om het HLW, de afvalvorm en de schacht- en drijfafdichtingen. Op de lange termijn is de primaire barrière de zoutgruis. Verwacht wordt dat dit materiaal na verloop van tijd ondoordringbaar wordt, hoewel de tijd die nodig is om deze toestand te bereiken, onzeker blijft.



EINDBERGING

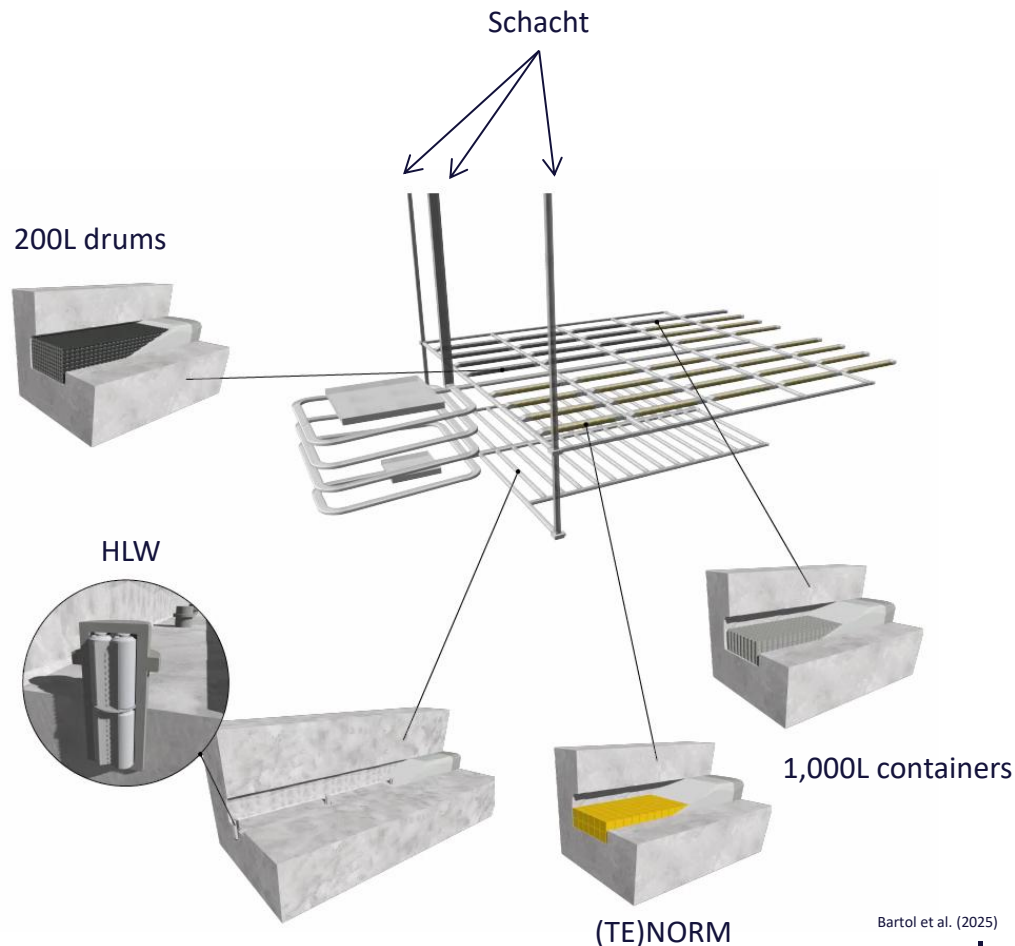
Het concept gaat uit van een eindberging in een zoutkoepel, met een ontwerp met twee niveaus om de verticale ruimte te maximaliseren. Voor horizontale zoutformaties zou in plaats daarvan een enkel niveau kunnen worden gebruikt.



Bartol et al. (2025)

EINDBERGING

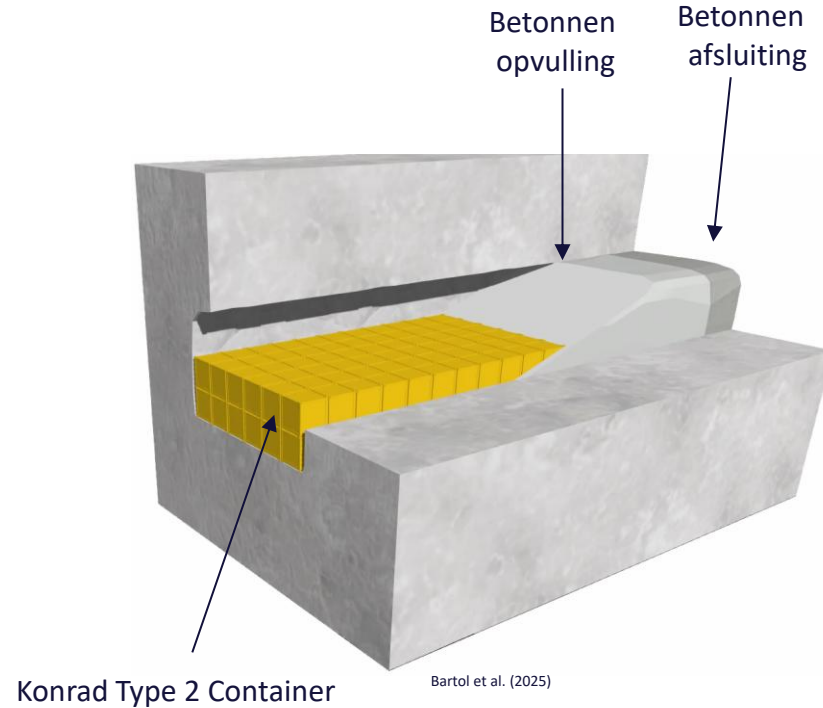
Indeling van de bergingsfaciliteit: LILW–(TE)NORM bevindt zich op de bovenste niveau en HLW op de onderste. Een spiraalvormige hellingbaan verbindt beide niveaus met elkaar, met infrastructuur op beide niveaus. Drie schachten verbinden de berging met de oppervlakte: twee voor ventilatie en transport werkers en één voor transport van afval.



EINDBERGING

In totaal zijn er 40 ruimtes van 100 m in lengte nodig om het LILW-(TE)NORM-afval te bergen. Elke ruimte wordt gevuld met afval, opgevuld met beton en afgedicht met twee betonnen drijflagen – één aan elke kant.

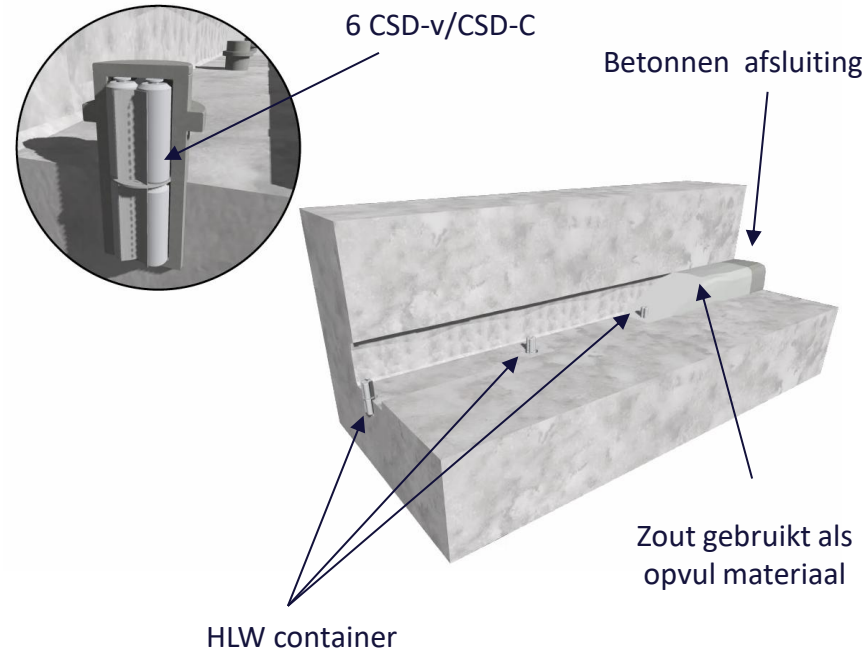
Een open vraag is welk type opvulmateriaal in de stortruimtes gebruikt moet worden. Het gekozen materiaal moet droog zijn, een lage permeabiliteit hebben, gemakkelijk te verwijderen zijn en voldoende druksterkte hebben.



EINDBERGING

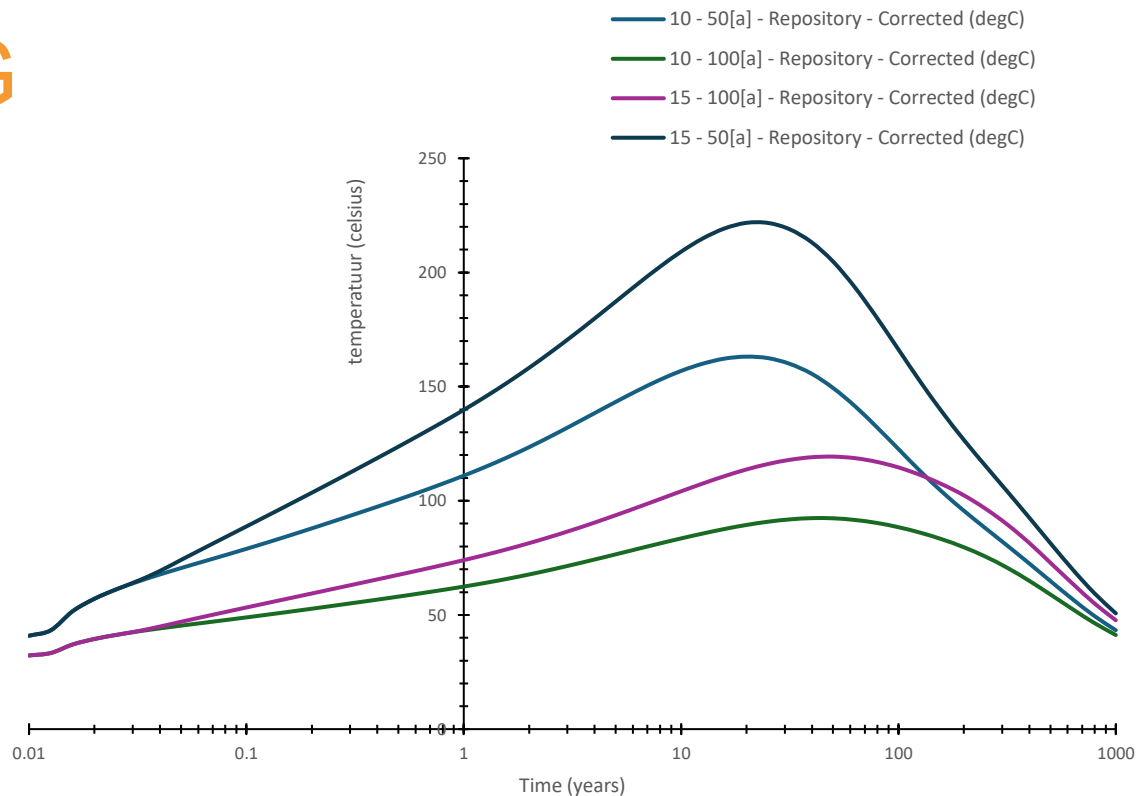
Elke HLW container biedt plaats aan maximaal zes CSD-V- of CSD-C-units en twee ECN-containers. De containers zijn ontworpen om minstens 1000 jaar insluiting te bieden. De containers worden verticaal zoutformatie geplaatst.

Openstaande vragen zijn onder andere of er alternatieve plaatsingsmogelijkheden zijn en of een HLW-container wel nodig is. Andere vraag is ook of de afstand tussen de HLW-containers, nu 10 meter, minder kan.



EINDBERGING

Nu al de eerste modellen aan het runnen om te kijken wat het maximale aantal HLW-containers per galerie is. En hoe we dit verder zouden kunnen optimaliseren.

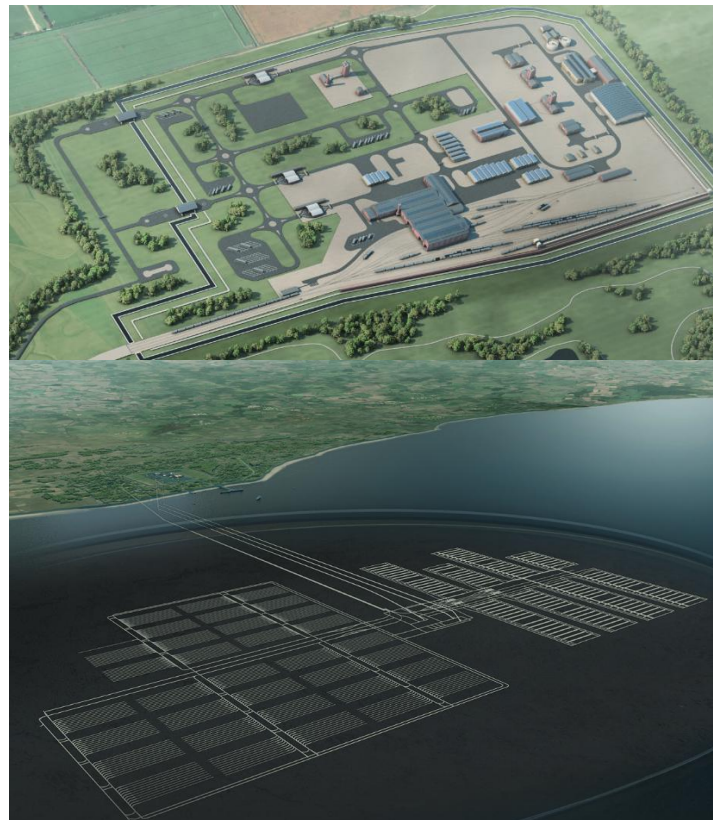


EINDBERGING



EINDBERGING

Wanneer de locatie van een eindberging is gekozen, kan de bouw van start gaan. In eerste instantie zullen de oppervlaktegebouwen worden gerealiseerd. Constructie kost ongeveer 7 jaar ongeacht de hoeveel afval.



Bron: Nuclear waste services, 2024.

EINDBERGING



Bron: Eigen foto



Voor de constructie van de eindberging kunnen dezelfde mijnbouwmachines en -technieken worden gebruikt als die momenteel in de zoutmijnbouw en de bouw van de WIPP zijn/worden toegepast. Er is dus veel ervaring er mee. De constructie van de eindberging duurt ongeveer 23 jaar. Hetzelfde geldt wanneer we rekening houden met grotere hoeveelheden afval. Dan zullen er meer machines worden gebruikt

Constructie

Plaatsing afval

Afsluiting

EINDBERGING

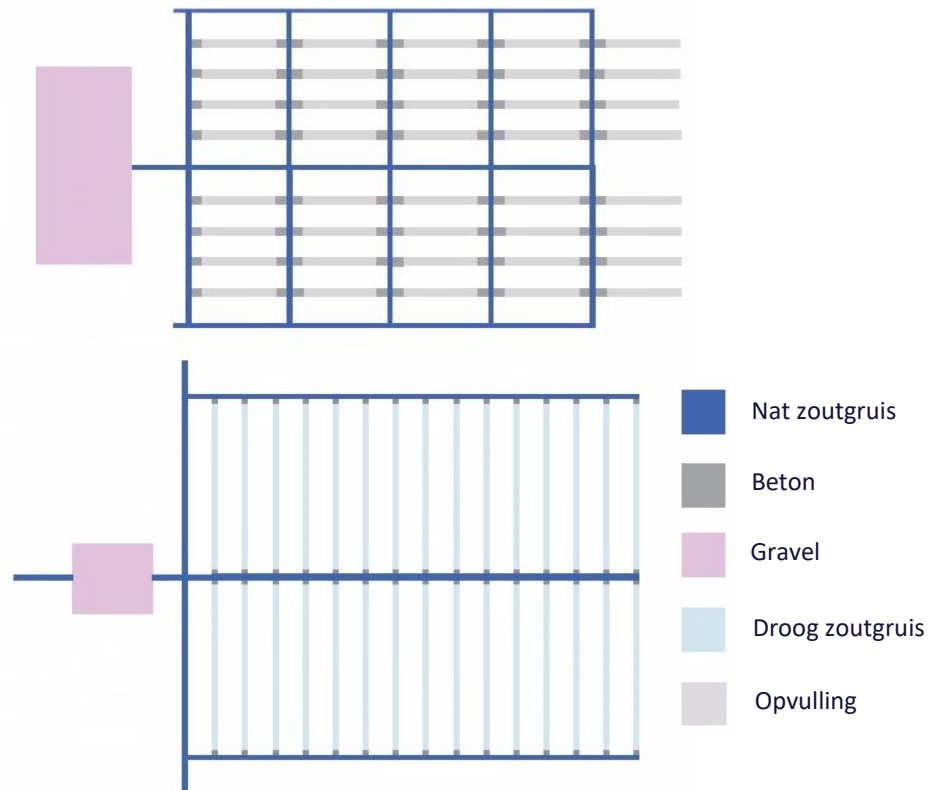
Het bergen van afval duurt ongeveer 18 jaar (1 jaar voor HLW en 17 jaar voor LILW-(TE)NORM). In het nieuwe scenario zal dit 4 jaar zijn voor HLW en 31 jaar voor LILW-(TE)NORM. Voor LILW en (TE)NORM zal een heftruck worden gebruikt, zoals dat nu ook bij COVRA gebeurt. Voor HLW zal een speciaal plaatsingsvoertuig worden ingezet.



EINDBERGING

Na een observatie periode van 10 jaar (of langer) wordt de eindberging afgesloten. Een groot deel van de open ruimtes zal worden opgevuld met zout wat is vrijgekomen tijdens de constructie van de eindberging, wat initieel een hoge porositeit en permeabiliteit heeft, maar uiteindelijk ondoordringbaar word.

Op andere plekken zullen, zullen afsluitingen worden gemaakt van speciaal beton. Dit verwachting is dat dit beton minimaal 50,000 jaar meegaat. Daarnaast zullen de infrastructuur ruimtes worden opgevuld gravel. In totaal kost het afsluiten 8 of 11 jaar.



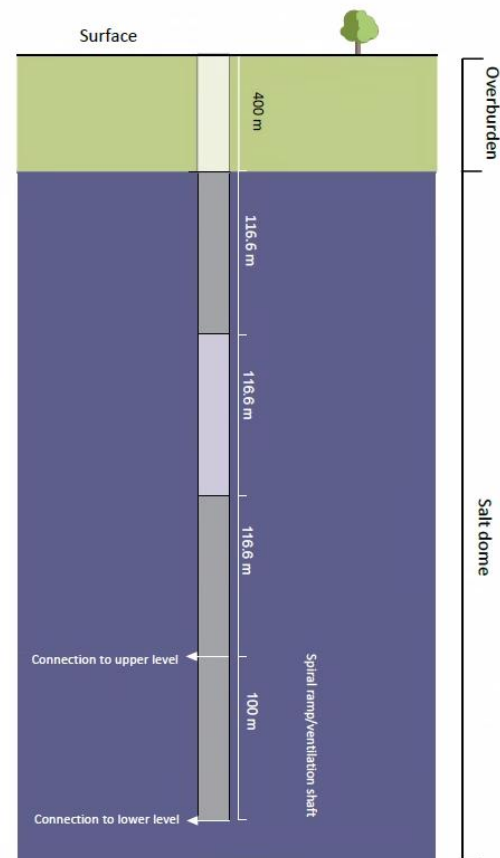
Constructie

Plaatsing afval

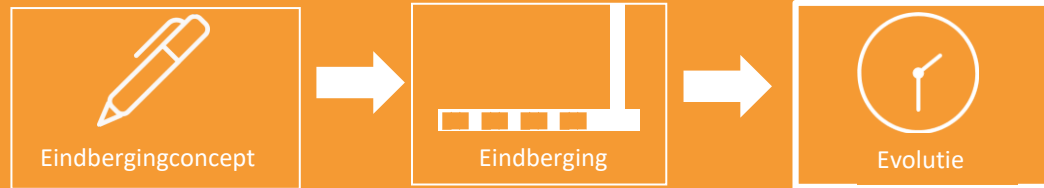
Afsluiting

EINDBERGING

Ook de schachten zullen worden opgevuld met een combinatie van zout en beton. Dit is voor nu een versimpeling. In andere landen wordt vaak een combinatie van verschillende materialen gebruikt, zoals bitumen en grind, die verschillende functies in de schachten vervullen. Voor Nederland moet nog een specifieke afsluiting worden ontwikkeld. Dit zal waarschijnlijk van locatie tot locatie verschillen.



EINDBERGING



WATER

Water is zowel vriend als vijand van Nederland. Het is al lang een bron van welvaart en maakt handel, landbouw en innovatie in waterbeheer mogelijk. Tegelijkertijd vormt het een constante bedreiging, aangezien een groot deel van het land onder de zeespiegel ligt en kwetsbaar is voor overstromingen zoals in 1953.

Op dezelfde manier is water dat volledig verzadigd is met zout, ook wel pekkel, zowel vijand als vriend in een eindberging in zout want.



Een vriend



Een vijand

WATER: VIJAND

Oplossen van nucliden: Water is een vloeistof waarin radionucliden kunnen oplossen. Dit is de eerste noodzakelijke stap voor transport, omdat alleen opgeloste nucliden zich kunnen verplaatsen met het grondwater en zo uiteindelijk de biosfeer kunnen bereiken.

Transport van nucliden. Nadat radionucliden in water zijn opgelost, kan het water fungeren als transportmedium. Via stroming en diffusie kunnen de opgeloste nucliden zich verplaatsen door het zout gruis, wat uiteindelijk kan leiden tot migratie richting de biosfeer.

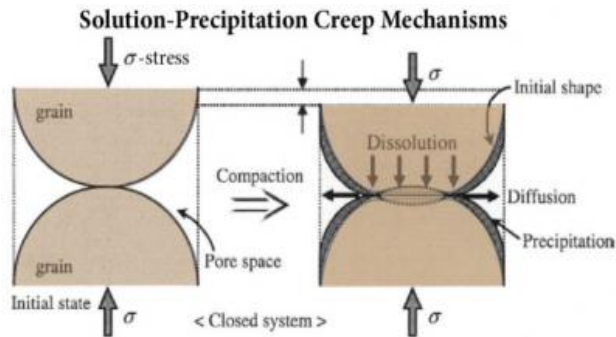
Corrosie van containers: Water kan corrosie veroorzaken, wat kan leiden tot gasvorming en uiteindelijk tot vertraging van de zoutgruis compactie, en in het uiterste geval tot een release.



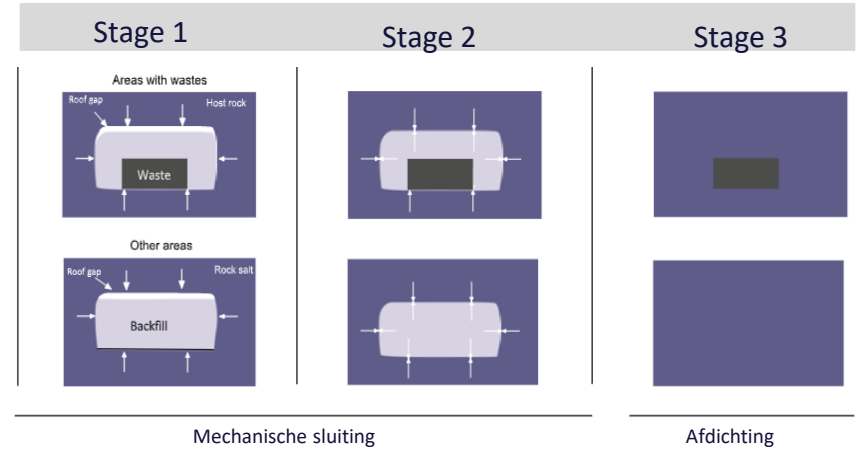
Photo from kuhlman.

WATER : VRIEND

Water is ook een vriend: het is namelijk belangrijk voor compactie van het steengruis want een beetje water is nodig voor het proces pressure solution. Dit proces zorgt er uiteindelijk voor dat het zoutgruis ondoorlatend wordt. Zonder water is dit proces niet actief.



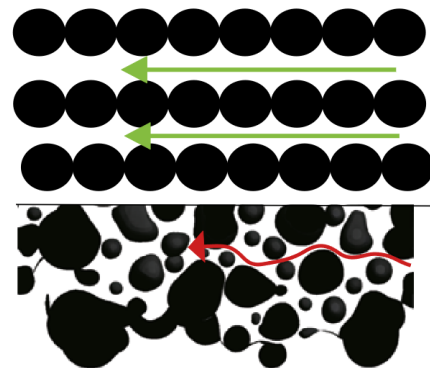
(Yasuhara et al., 2004)



De vraag is alleen: hoeveel water is er nodig? En wat gebeurt er wanneer het opvulmateriaal niet uitsluitend uit zout bestaat? Tot slot: kunnen de modellen uit het lab ook op grotere schaal worden toegepast?

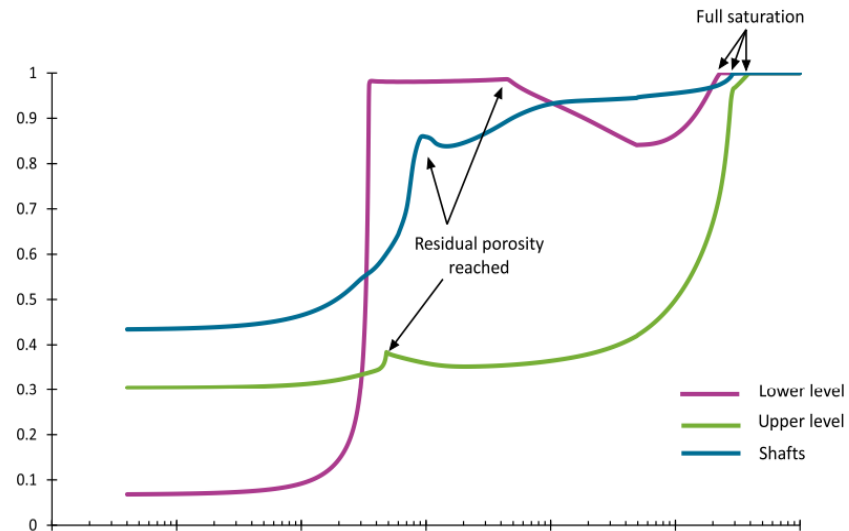
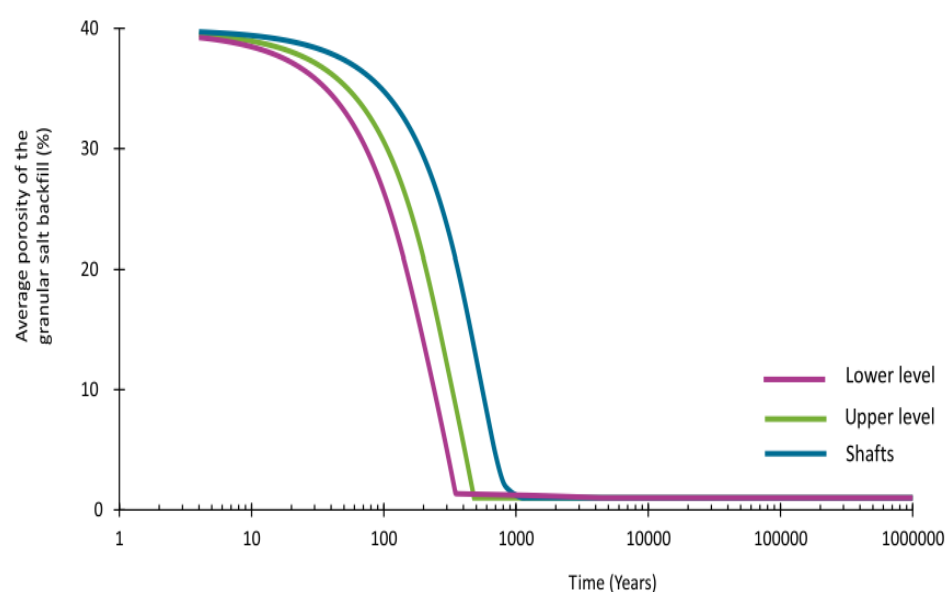
MODELBEREKENING

Een computermodel is ontwikkeld binnen het DECOVALEX-project (2025–2027) om veiligheidsberekeningen uit te voeren voor een generieke eindberging in zout. In het model worden enkele vereenvoudigde aannames gehanteerd: er vindt geen gasgeneratie plaats, radionucliden lossen direct op, en compactie is temperatuuraafhankelijk. Het model beschouwt enkel fase 2 met permeabel zoutgruis, waarbij diffusie enkel van porositeit afhangt. De simulatie is tweedimensionaal, en alle betonnen afsluitingen worden geacht te falen na 50.000 jaar. Het model is dus erg conservatief.



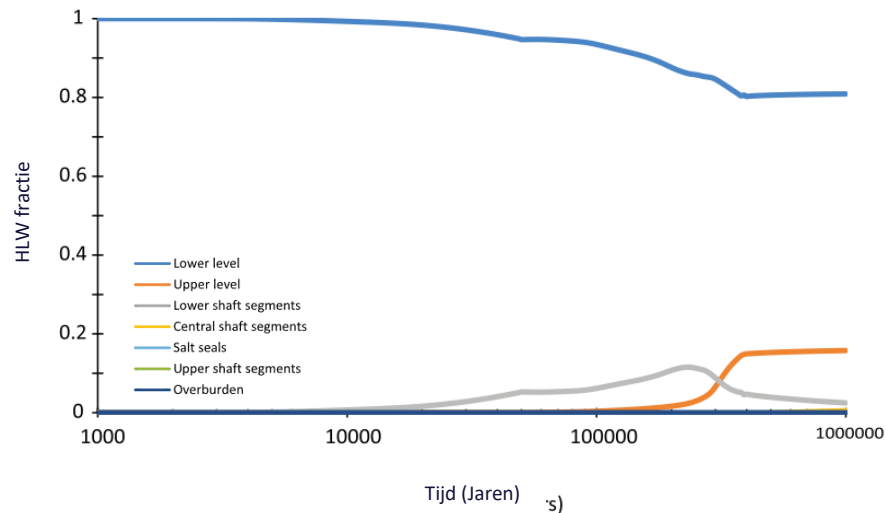
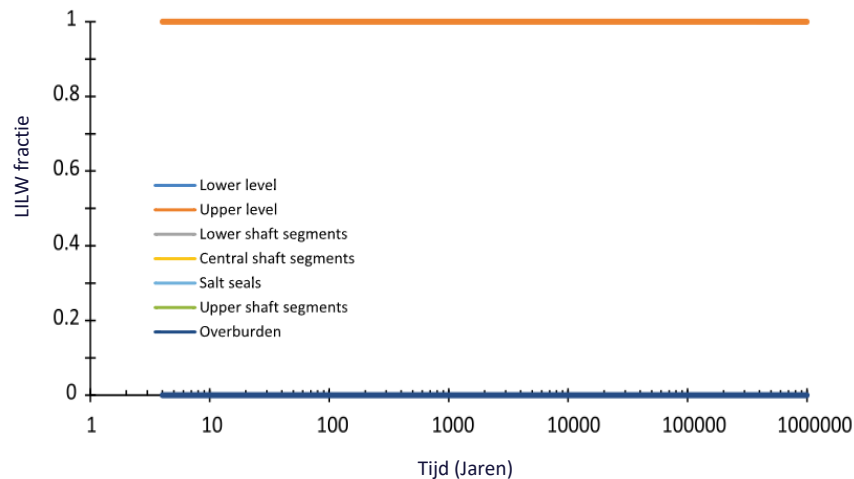
MODELBEREKENING

Compactie leidt tot een afname van de porositeit en van de verzadiging. Naarmate de lege ruimtes tussen de zoutkorrels kleiner worden, wordt de resterende poriënruimte steeds meer gevuld met pek.



MODELBEREKENING

Terwijl pekkel door de eindberging stroomt vanwege compactie, kan het radionucliden uit afvalvormen oplossen en meevoeren. Na 1 miljoen jaar, blijven eindberging vrijwel alle radionucliden van LILW in de bovenste niveau, terwijl er wel enig transport van HLW plaatsvindt vanaf het onderste niveau, maar geen radionucliden verlaat de eindberging.



MODELBEREKENING

Samenvattend kunnen we stellen dat, onder normale evolutie, gedurende ten minste een miljoen jaar na de afsluiting het volgende geldt: ***what is placed in salt stays in salt****.

*wanneer de eindberging zich ontwikkeld als verwacht.

UITDAGINGEN

- Onderzoek is dus nog nodig;
 - De aanwezigheid en structuur van het gastgesteente in Nederland.
 - De kenmerken van het gastgesteente en de omliggende gesteente.
 - De aangebrachte barrières, zoals zoutgruis en beton.
 - Nieuwe afvalstromen.
- Zout is een veelzijdig materiaal: het kan niet alleen worden gebruikt voor eindberging, maar ook voor de opslag van waterstof en gas. Daarnaast wordt zout op verschillende plekken in Nederland gewonnen.

CONCLUSIE

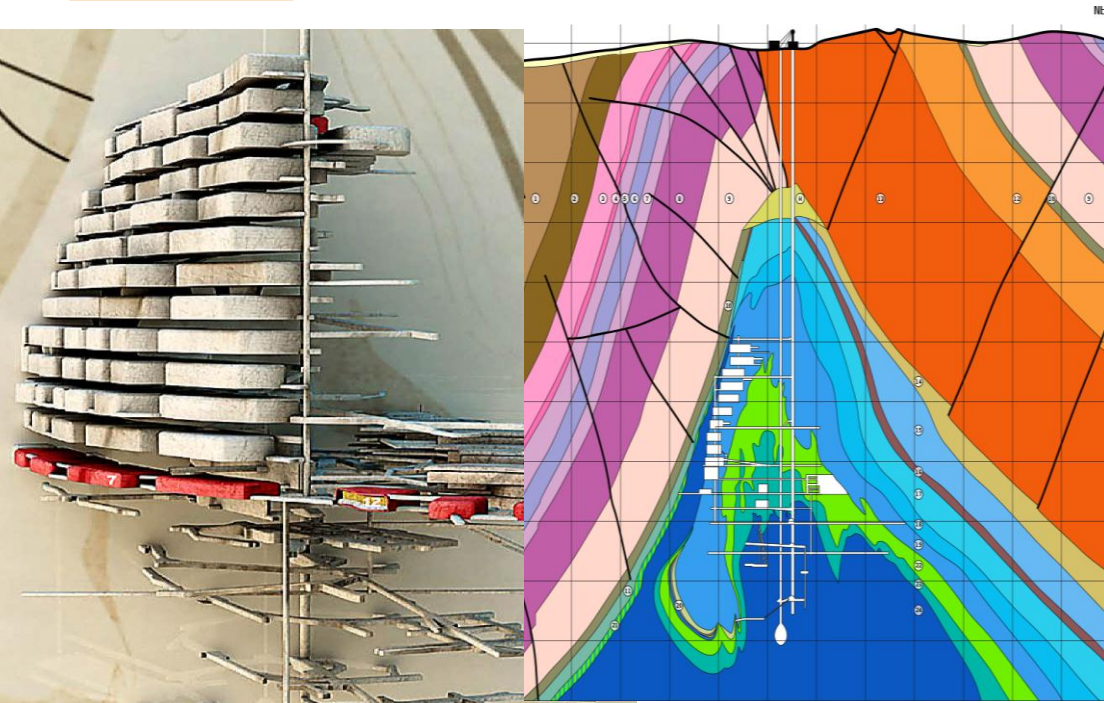
- Met de huidige kennis is een eindberging in zout mogelijk en veilig met de huidige technieken. Daarnaast is er ook veel ervaring met zout.
- Bij een eindberging in zout is de verwachting dat de radionucliden de eerste miljoen jaar niet de biosfeer bereiken. Dit geldt zowel voor de verwachte evolutie van de eindberging als voor alternatieve evoluties waarin bijvoorbeeld de HLW container helemaal geen bescherming biedt.
- Onderzoek blijft nodig. Onderzoek naar o.a. zout structuren, de barrières en opzetten van een digitale safety case. Ook moeten er nog stappen worden genomen in de veiligheidsberekeningen waaronder een 3D model.

Een eindberging in zout is dus zowel haalbaar als veilig.



Vragen?

ASSE, GERMANY



Asse mine

The asse mine is located at a depth of around 765 m. Like Morsleben it is initially a mine.

It was developed between 1906 and 1908 and salt rock salt mining ended in 1964 while potash production ended in 1925. 60% is extracted. 7 meter of surface subsidence.

Between 1967 and 1978, it was used to store low and intermediate level waste.

However, brine (water) started to flow into the mine (12 cubic metres a day).

For the current disposal concepts, **on purpose build repository** are proposed. Difference is the **amount of rock salt removed, location of the repository**.

MORSLEBEN, GERMANY



Morsleben mine

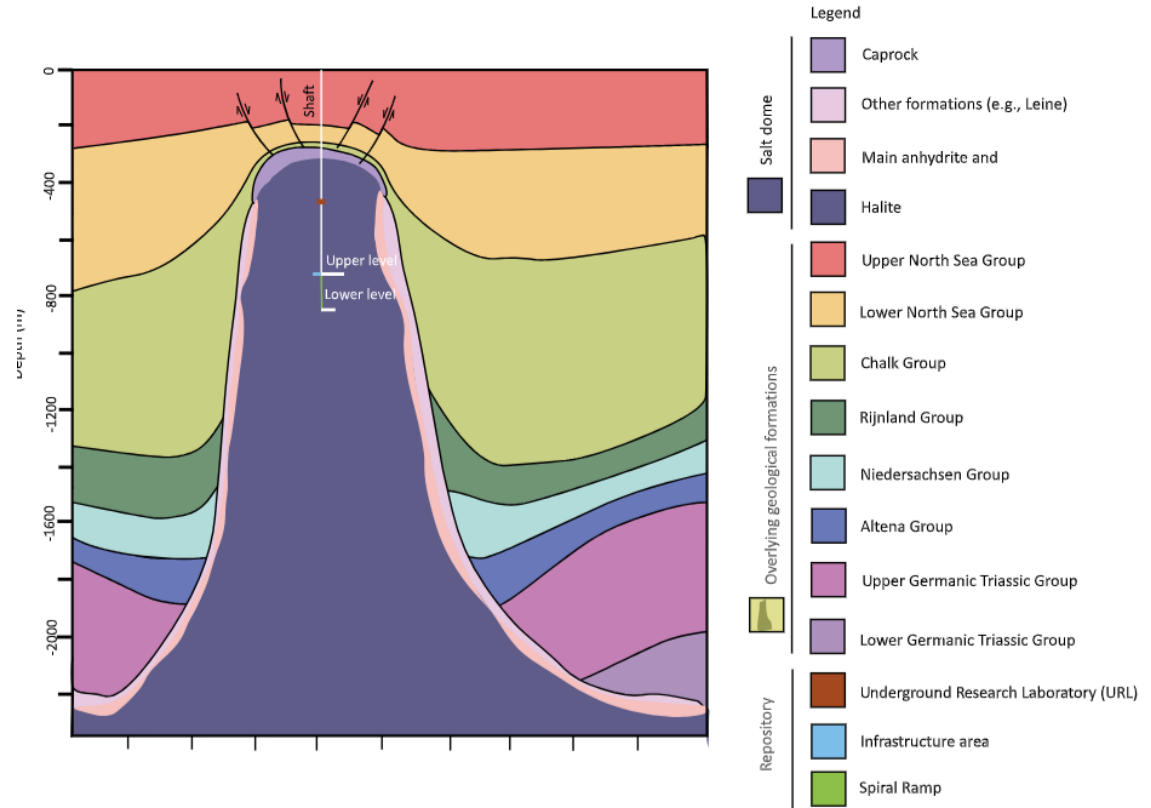
Mining started 1897 and hence Morsleben was a mine in the past.

The depth of the main mine structure is between 320 and 630 m.

Around 37,000 m³ of low and intermediate-level waste is disposed in this mine

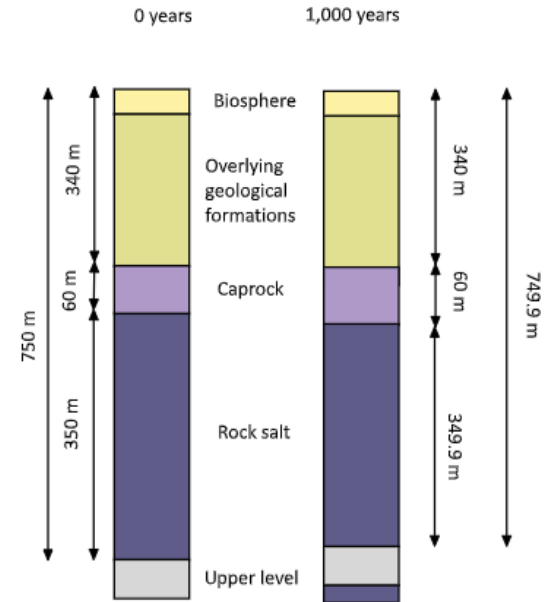
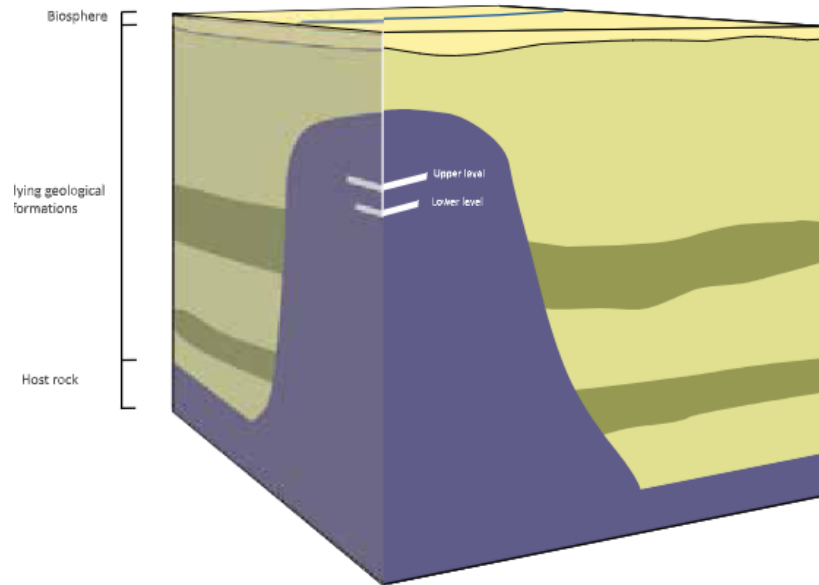
Currently in the decommissioning phase of the mine as safe closure of the Morsleben mine is possible.

EVOLUTION

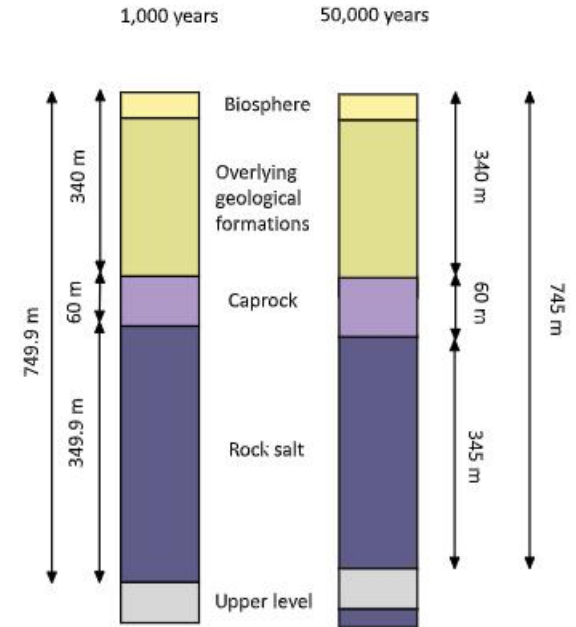
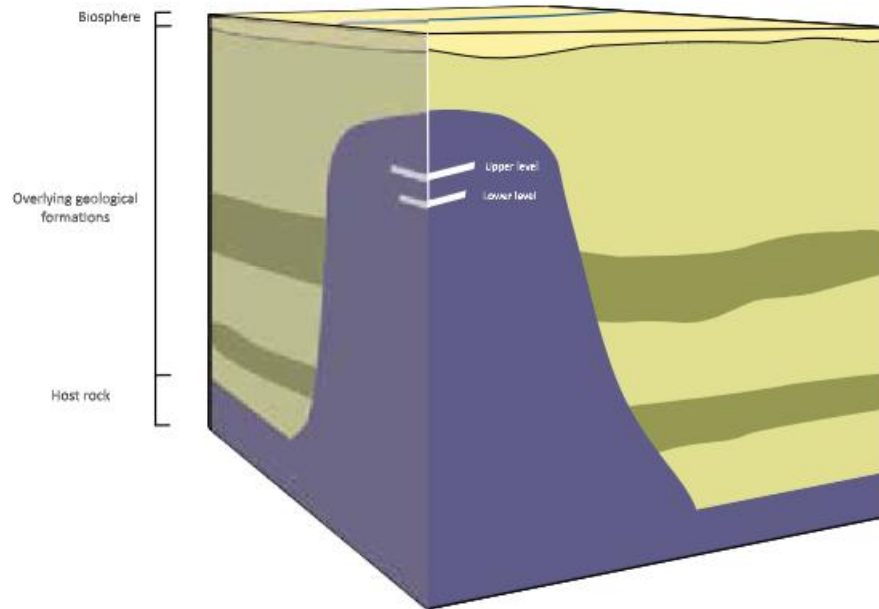


EVOLUTION

Closure – 1,000 years

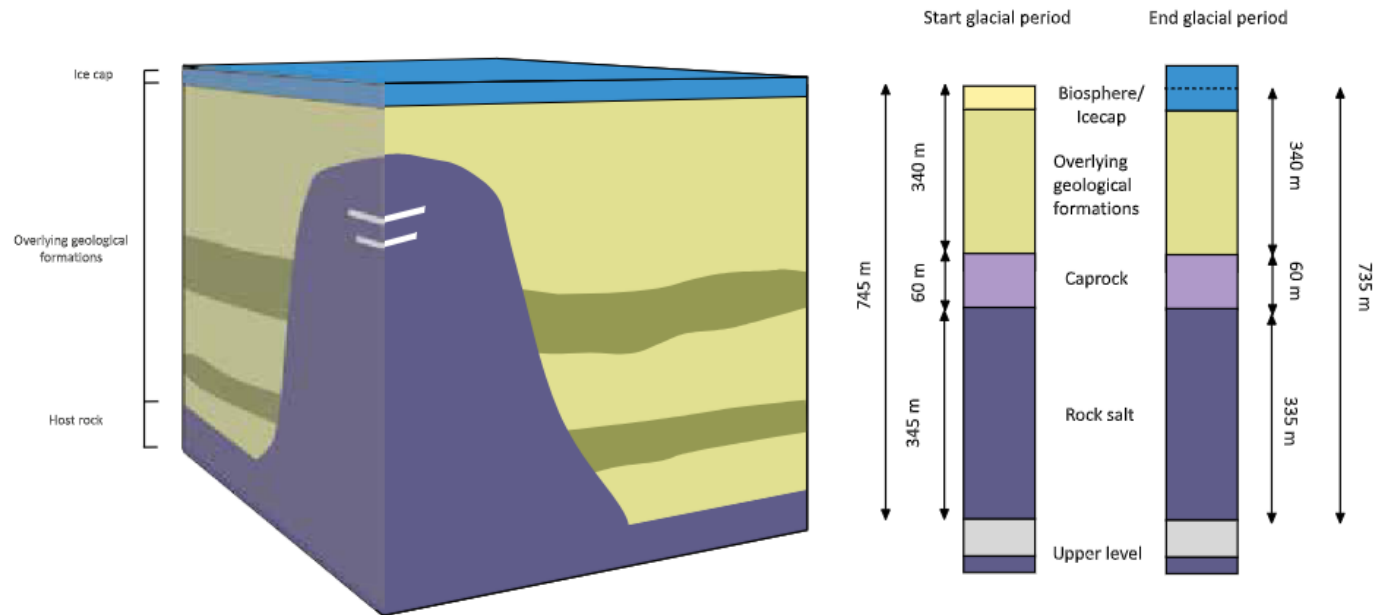


EVOLUTION



EVOLUTION

Next glacial period (50,000 to 150,000 years after closure)



EVOLUTION

End next glacial period - 1,000,000 years

